

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.Н. Шипунов, А.А. Гаврилов, Е.Н. Гаврилова

БАЛАНСИРОВКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ДАТЧИКА УГЛОВЫХ УСКОРЕНИЙ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», Арзамас

Предложенная конструкция чувствительного элемента датчика угловых ускорений обладает высокой чувствительностью к полезному сигналу, но также чувствительна к линейному ускорению и угловой скорости. В статье теоретически обоснованы и экспериментально апробированы методики отстройки чувствительного элемента от линейного ускорения и угловой скорости.

Ключевые слова: чувствительный элемент, угловое ускорение, статическая балансировка, динамическая балансировка.

Проблема измерения угловых ускорений вращающихся элементов машин и механизмов является одной из наиболее важных в контрольно-измерительной технике. Машиностроение и ракетостроение, судостроение и энергетика – далеко не полный перечень отраслей народного хозяйства, дальнейшее развитие которых зависит от решения этой проблемы. Знание углового ускорения имеет значение и для решения задач навигации и управления, а также для технической диагностики и определения механических характеристик машин и механизмов в динамических режимах. Однако механика измерения угловых ускорений пока еще находится в стадии становления и для ее развития требуется анализ и обобщение многолетнего опыта работы в этой области измерительной техники.

Разрабатываемый датчик предназначен для измерения угловых ускорений и представляет собой датчик компенсационного типа, состоящий из чувствительного элемента и сервисной электроники, располагающихся в герметичном корпусе с выводными контактами.

Чувствительный элемент представляет собой инерционную массу, содержащую подвижную обкладку из кремния 1 с закрепленным на ней кольцом из титана 2 (рис. 1). Подвижная обкладка закреплена на двух упругих подвесах 3 и содержит две катушки обратной связи 4 датчика момента (ДМ). Рамка подвижной обкладки соединена электростатической диффузионной сваркой со стеклянной неподвижной обкладкой 5 датчика угла с нанесенными на нее металлизированными полигонами. Подвижная и неподвижная обкладки образуют емкостной датчик угла.

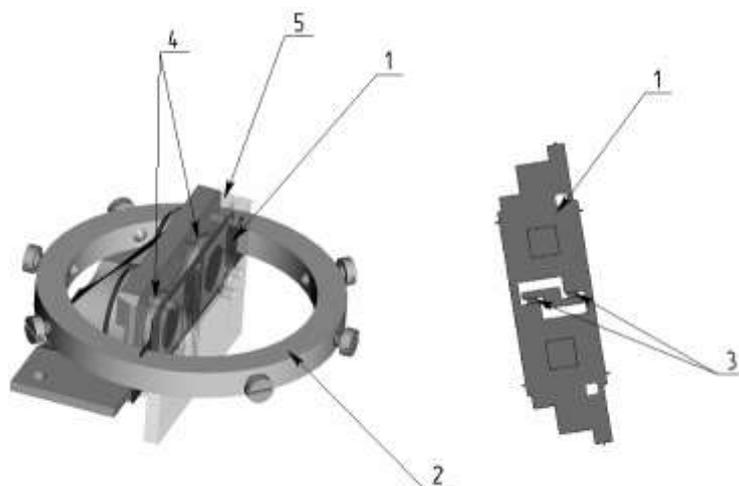


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента

Чувствительный элемент наряду с угловым ускорением воспринимает линейное ускорение и угловую скорость, причем величина полезного сигнала мала. Для решения этой проблемы в первоначальную конструкцию (без кольца) было введено титановое кольцо с регулировочными винтами. Оно позволило увеличить инертную массу и как следствие чувствительность к угловому ускорению. Максимальное угловое ускорение, на которое рассчитан датчик, составляет $2400 \text{ }^\circ/\text{с}^2$; при этом создается ток в катушках датчика момента обратной связи, эквивалентный току в этих катушках на линейном акселерометре АТ1104 при воздействии ускорения в $7g$.

При действии углового ускорения $\ddot{\psi}$ подвижная обкладка чувствительного элемента отклоняется на определенный угол α , изменяя при этом дифференциальную емкость датчика угла (рис. 2). Разбаланс емкостей преобразуется сервисной электроникой датчика в напряжение, которое подается на катушки ДМ и нагрузочное сопротивление R_n .

Для получения требуемых точностных характеристик в динамическом режиме датчик построен по схеме с обратной связью. Датчик момента компенсирует внешнее воздействие измеряемой величины, а требующийся для этого ток прямо пропорционален внешнему воздействию и является выходным параметром датчика.

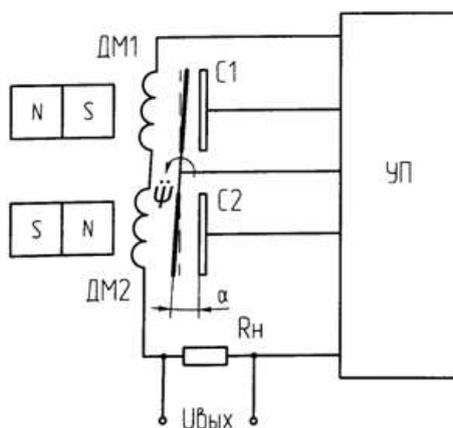


Рис. 2. Принципиальная схема датчика углового ускорения

Таким образом, устройство является маятниковым компенсационным датчиком с электропружиной и емкостным преобразователем угла.

Функциональная схема датчика изображена на рис. 3.

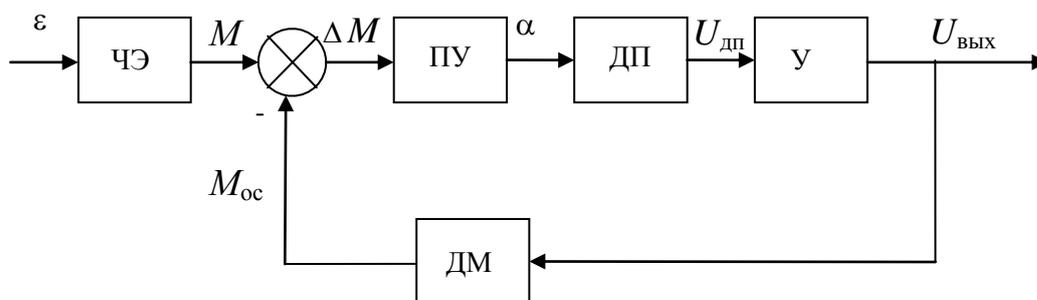


Рис. 3. Функциональная схема датчика угловых ускорений

На функциональной схеме обозначено: ЧЭ – чувствительный элемент, ПУ – подвижный узел, ДП – датчик перемещений (датчик угла), У – усилитель, ДМ – датчик момента,

ε – измеряемое угловое ускорение, M – инерционный момент, M_{oc} – момент обратной связи, α – угол отклонения маятника от нейтрали, $U_{дп}$ – выходное напряжение датчика угла, $U_{вых}$ – выходное электрическое напряжение.

При действии измеряемого углового ускорения на чувствительный элемент возникает инерционный момент M , пропорциональный ускорению. Разность ΔM инерционного момента M и момента обратной связи M_{oc} вызывает перемещение подвижного узла ПУ на угол α . В результате изменяются величины зазора между обкладками измерительных емкостей ДП, что приводит к дисбалансу емкостной мостовой схемы. Напряжение $U_{дп}$ разбаланса усиливается усилителем U , преобразуется в выходное напряжение датчика $U_{вых}$, сигнал которого используется для обратной связи.

Физический принцип измерения, заложенный в датчик углового ускорения, предполагает чувствительность датчика к линейному ускорению и угловой скорости. Эти воздействия являются помехами по отношению к полезному сигналу – угловому ускорению, что требует компенсации (отстройки). Конструкция чувствительного элемента содержит шесть винтов (рис. 1) для балансировки: статической для отстройки от линейных ускорений, динамической – для отстройки от угловой скорости.

Основной задачей является разработка методики статической и динамической балансировки.

Статическая балансировка датчика может быть осуществлена с помощью 4-х регулировочных винтов, расположенных в инерционной массе (титановом кольце, вклеенном в кристаллический элемент) так, чтобы каждая пара винтов лежала на одной оси, а их оси пересекались. На рис. 4 показано положение регулировочных винтов массой m до регулировки, пунктиром показано первоначальное положение центра тяжести инерционной массы.

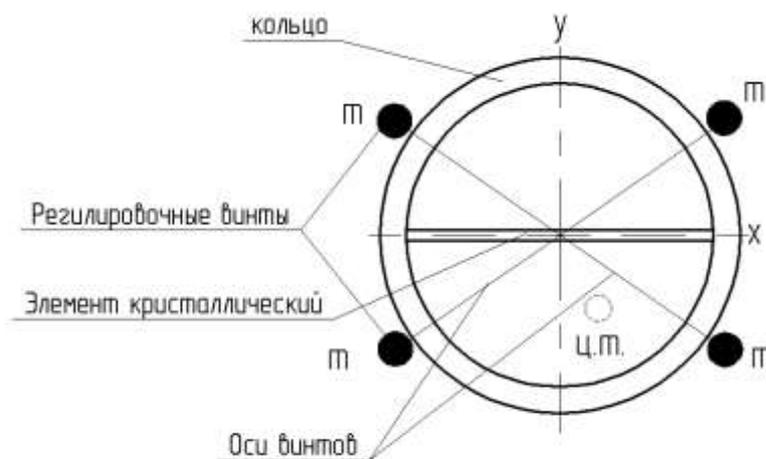


Рис. 4. Схема для статической балансировки

Принцип статической балансировки заключается в том, чтобы перемещением регулировочных винтов добиться совпадения центра тяжести инерционной массы с осью чувствительности датчика. Изначальное несовпадение центра тяжести с осью чувствительности обусловливается рядом причин: неточность установки титанового кольца, несимметричность конструкции чувствительного элемента, неидеальность изготовления деталей ЧЭ.

Так как балансировка датчика осуществляется с помощью регулировочных винтов, то кольцо и элемент кристаллический можно исключить из расчета.

Проанализируем поведение статически отбалансированной инерционной массы, состоящей из 4-х винтов (рис. 5) при действии на нее угловой скорости.

Рассмотрим общий случай, когда оси винтов пересекаются друг с другом под углом β , а вектор угловой скорости перпендикулярен оси чувствительности и повернут на произволь-

ный угол α относительно оси x , являющейся биссектрисой угла β . Пара винтов АВ и пара винтов CD под действием центробежных сил стремятся развернуться вокруг оси чувствительности так, чтобы составить перпендикуляр с вектором угловой скорости. Создаваемые при этом центробежные моменты будут направлены в разные стороны.

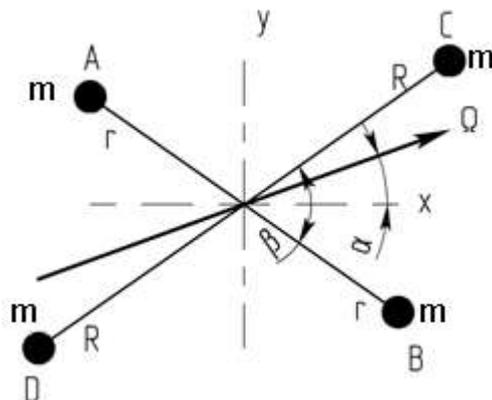


Рис. 5. Статически отбалансированная система из четырех винтов

Рассмотрим действие угловой скорости на каждую пару винтов АВ и CD (рис. 6).

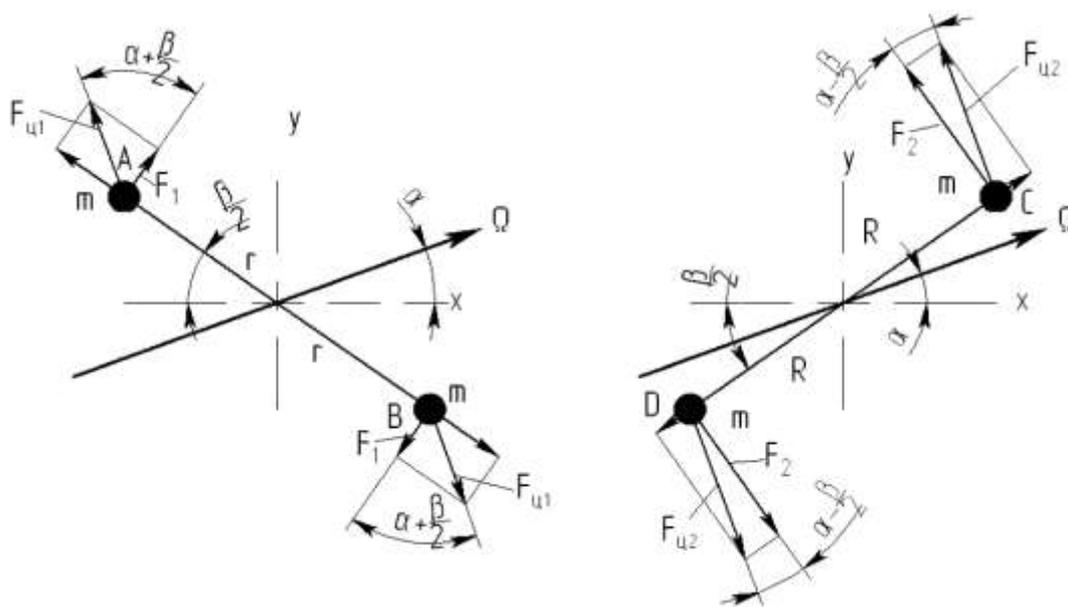


Рис. 6. Действие угловой скорости на пары винтов

Возникающие центробежные силы $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$ будут определяться выражениями:

$$F_{ц1} = m \cdot \Omega \cdot r \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right),$$

$$F_{ц2} = m \cdot \Omega \cdot R \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right),$$

где $F_{ц1}, F_{ц2}$ - центробежные силы, Н; m - масса ЧЭ, кг; Ω - угловая скорость, $^\circ/c^2$; R, r - плечи приложения центробежных сил, м.

В результате центробежные моменты определяются как произведение силы, стремящейся развернуть винты на расстояние, где эта сила возникает:

$$M_1 = F_1 \cdot r = F_{u1} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \cdot r = m \cdot \Omega^2 \cdot r^2 \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) = \frac{m \cdot \Omega^2 \cdot r^2}{2} \sin(2\alpha + \beta),$$

$$M_2 = -F_1 \cdot R = F_{u2} \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \cdot r = m \cdot \Omega^2 \cdot R^2 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) = \frac{m \cdot \Omega^2 \cdot r^2}{2} \sin(2\alpha - \beta).$$

Произведение $m \cdot r^2$ или $m \cdot R^2$ - момент инерции материальной точки J_x в данном случае винтов.

Для того чтобы датчик не чувствовал действие угловой скорости, необходимо, чтобы сумма возникающих моментов была равна 0 независимо от угла приложения вектора угловой скорости α :

$$\sum M_i = 0 \text{ или } M_1 = -M_2. \quad (1)$$

Условие выполняется в случае, когда:

- угол $\beta=90^\circ$, т.е. когда оси винтов расположены по отношению друг к другу под прямым углом;
- моменты инерции пар винтов J_x равны между собой (при одинаковой массе винтов $R = r$).

Ввиду неидеальности изготовления и установки инерционного кольца угол $\beta \neq 90^\circ$, поэтому с помощью 4-х регулировочных винтов отстройку от действия угловой скорости осуществить невозможно.

Рассмотрим систему, состоящую из шести регулировочных винтов, где добавляется еще одна пара винтов, ось которых ортогональна оси x (рис. 7).

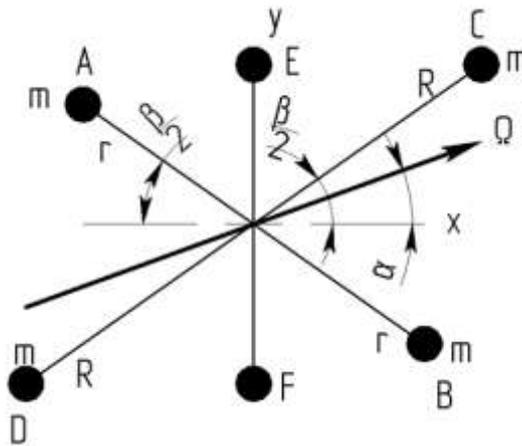


Рис. 7. Система из 6 балансировочных винтов

В связи с доработкой появляется еще один центробежный момент от пары винтов EF:

$$M_3 = J_{EF} \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = \frac{J_{EF} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha).$$

Сохраняя условие (1):

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0,$$

получим:

$$\frac{J_{AB} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha + \beta) - \frac{J_{CD} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha + \beta) + \frac{J_{EF} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha + \beta) = 0,$$

$$J_{EF} = -2\cos(2\beta).$$

При условии $J_{AB} = J_{CD} = J$:

$$J \cdot (\sin(2\alpha) \cdot \cos\beta - \cos(2\alpha) \cdot \sin\beta + \sin(2\alpha) \cdot \cos\beta + \cos(2\alpha) \cdot \sin\beta) + J_{EF} \sin(2\alpha) = 0,$$

$$J_{EF} = -2\cos(2\beta).$$

Отсюда следует, что в системе, состоящей из 3-х пар регулировочных винтов, оси которых неперпендикулярны, можно выполнить балансировку.

Статическую балансировку проводят в поле постоянного линейного ускорения. В качестве постоянного ускорения выбрано ускорение свободного падения.

Датчик закрепляется на делительной головке по направлению действия ускорения свободного падения и соединяется с источником питания и вольтметром. В начальном положении записывается нулевой сигнал. Затем производится поворот на 90° и снова записывают значение нулевого сигнала. Таким же образом выполняются еще два измерения. Балансировка осуществляется перемещением регулировочных винтов отверткой без дополнительных приспособлений, при этом разрушение механических подвесов элемента кристаллического не происходит. Регулировкой необходимо добиться того, чтобы значения нулевого сигнала были равны. После статической балансировки по 4 точкам датчик отбалансирован по всем другим направлениям.

Диаграмма несбалансированного датчика представлена на рис. 8, а. Значения, расположенные на диаграммах по окружности от 0 до 350 , соответствуют углу наклона датчика относительно \vec{g} , значения выходного сигнала датчика расположены радиально.

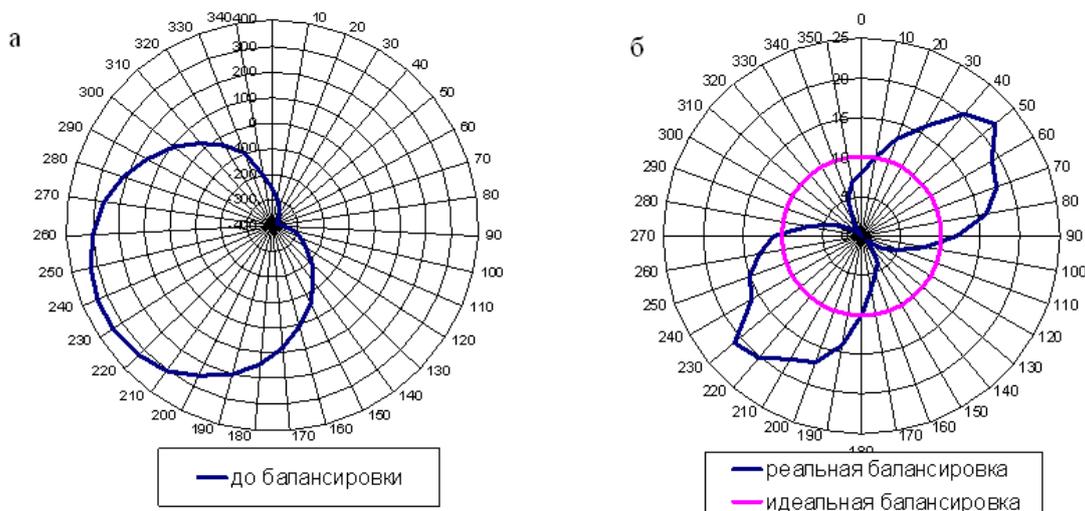


Рис. 8. Несбалансированный датчик:
а – до балансировки; б – после балансировки

В идеальном случае балансировки выходной сигнал датчика в любом положении должен быть равен нулевому сигналу и кривая диаграммы должна выглядеть как окружность с радиусом, равным нулевому сигналу датчика, и располагаться в центре диаграммы.

Диаграммы отстройки от действия линейного ускорения показаны на рис. 8, б.

Кривая диаграммы отбалансированной системы имеет вид петли, что обуславливается прогибом маятника. Так как емкостные полигоны неподвижной обкладки располагаются на одной стороне, то в определенном положении датчика прогиб маятника создает минимальные рабочие зазоры в ёмкостях и малейший дисбаланс центра масс вызывает значительное изменение выходного сигнала датчика. Напротив, в противоположном положении датчика дисбаланс центра масс не чувствуется. В результате диаграмма имеет области выступов и впадин относительно нулевого сигнала. Погрешность от действия линейного ускорения составляет 0,8%.

Еще одной составляющей суммарной погрешности датчика является погрешность от действия угловой скорости. Поскольку угловое ускорение объекта варьируется от $200^\circ/\text{с}^2$ до $600^\circ/\text{с}^2$ на частотах от 1 Гц до 10 Гц, то максимальная угловая скорость объекта определится:

$$\Omega = \frac{\ddot{\psi}}{2\pi f} = \frac{600}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} = 95^\circ/\text{с}.$$

В результате работ по отстройке от действия угловой скорости выявлено, что отстройку осуществлять не требуется, поскольку при действии угловой скорости на датчик, равной $\Omega = 120^\circ/\text{с}$, погрешность составляет 0,6%. Тем не менее, возможность балансировки в конструкции предусмотрена наличием дополнительных регулировочных винтов.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н.Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Вавилов, В.Д.** Конструирование интегральных датчиков / В.Д. Вавилов, В.И. Поздьяев. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 68 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2011*

A.N. Shipunov, A.A. Gavrilov, E.N. Gavrilova

BALANCING THE INTEGRAL SENSOR OF THE ANGULAR SPEEDUPS

The Offered design of the detector element of the sensor of the angular speedups possesses high sensitivity to useful signal, but also sensitive to linear speedup and angular velocity. In article are theoretically motivated and experimental is proved methodsdes adjustment detector element from linear speedup and angular velocity.

Key words: sensor, acceleration, static balancing, dynamic balancing.